

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В РЕЗУЛЬТАТІ ПРОТІКАННЯ СТРУМУ В СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

© Стрілецький Ю.Й., Боднар Р.Т., 2007

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Розглянуто основи математичного моделювання електричних властивостей системи підземний трубопровід – ізоляційне покриття – ґрунт. Проаналізовано вплив властивостей ґрунту на результати вимірювання напруженості електричного та магнітного полів, утворених протіканням струму в стінках підземного трубопроводу

Збереження працездатності розгалуженої мережі трубопроводів в Україні є важливим завданням. Більшість трубопроводів прокладені під землею, вони потрапляють під руйнуючу дію корозійних процесів. Антикорозійний захист дозволяє не тільки заощадити кошти, підтримуючи в працездатному стані обладнання, але й запобігти аварії.

Здебільшого підземні трубопроводи від корозії захищають за допомогою антикорозійного покриття та катодного захисту. Для проектування захисту використовують певні математичні моделі. За допомогою ЕОМ моделюють електрохімічну систему й оцінюють, чи може трубопровід із запропонованим покриттям і при вибраних зовнішніх умовах бути захищений за допомогою розробленого катодного захисту. Це пряме вирішення задачі захисту, що передбачає визначення всіх фізичних властивостей трубопроводу, анодів, ґрунтової подушки, ґрунту, розподілів струму й потенціалу на трубопроводі.

У такий спосіб можна виявити пере захищені та недо захищені ділянки трубопроводу. Також такі моделі використовують для розрахунку потенціалу й щільності струму для захисту трубопроводу від корозії, наприклад на поверхні ґрунту або в зазначених місцях, де можуть бути закопані випробувальні зразки. Наявність такої моделі дає можливість розв'язувати ситуаційні задачі. Наприклад, що трапиться, якщо відсутня частина покриття на окремій ділянці поверхні труби, чи якщо прокладуть нову трубу паралельно існуючому трубопроводу?

Модель електрохімічної системи пов'язує електричний потенціал, струм, електричні провідності середовищ, в яких проходить дослідження, а також залежності швидкості проходження електрохімічних реакцій. Тому можна визначати швидкість втрати матеріалу труби при заданих умовах експлуатації.

При електрохімічній корозії немає втрати чи підсилення електричного струму, тому

$$\frac{\partial i_x}{\partial x} + \frac{\partial i_y}{\partial y} + \frac{\partial i_z}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

де i_x, i_y, i_z - компоненти вектора струму в середовищі.

Струм прямо пов'язаний із першою похідною від потенціалу Φ :

$$i = -\sigma \cdot \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right), \quad (2)$$

де σ - питома електропровідність електроліту.

Комбінуючи рівняння (1) і (2), отримаємо, що

$$-\sigma \cdot \left(-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \right) = 0. \quad (3)$$

Питома електропровідність σ може бути константою чи функціональною залежністю. Якщо прийняти, що електропровідність буде константою, то рівняння (3) перетвориться на рівняння Лапласа, тобто

$$\sigma \cdot \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (4)$$

$$\text{або} \quad \sigma \cdot \nabla^2 \Phi = 0. \quad (5)$$

Якщо рівняння Лапласа використовується для опису процесу корозії, то всі ефекти з джерелами і споживачами електричного струму в математичній моделі описують граничними умовами. Поверхня модельованої області має фіксований потенціал

$$\Phi = C_1, \quad (6)$$

де C_1 - константа. Це перша гранична задача, або задача Діріхле [1]. При такому типі граничних умов залежна змінна - електричний потенціал має визначене значення, яке може використовуватися для моделювання аноду чи іншого електричного

джерела, яке залишається постійним з умови динамічної рівноваги системи.

Струм джерела електричного струму визначається із співвідношення

$$i = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = C_2, \quad (7)$$

де n - нормаль до границі, C_2 - константа. Електричні джерела і споживачі є другою граничною задачею, або задачею Неймана. Нормальна похідна залежної змінної електричного струму чи потоку струму задається конкретним значенням, якщо відомі значення градієнту потенціалу у всіх точках, що обмежують область. Ізольовані поверхні часто представляють так:

$$i = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0. \quad (8)$$

Граничні умови Неймана можуть також використовуватися для моделювання анодів чи інших електричних джерел струму, коли електричний струм можна представити постійним значенням. Таким чином, можна представити будь-які електричні джерела, які не змінюються в часі.

Електричний струм чи густина струму незахищеної металевої поверхні визначаються поляризаційною залежністю від електричного потенціалу на поверхні металу:

$$i = f(\Phi), \quad (9)$$

де f - функціональна залежність струму від потенціалу. В області реакції Тафеля поляризаційну залежність між електричним струмом та потенціалом можна вважати лінійною, однак здебільшого ця залежність нелінійна. Поляризація анодної та катодної реакції зазвичай не представляються аналітичним розв'язком. Поляризаційна реакція визначає третю граничну умову Коші, при яких граничні умови функціонально залежні в даному випадку від електричного потенціалу. Граничні умови Коші також відомі як змішані [2].

Враховуючи наведені залежності, було змодельовано ділянку однорідного середовища P із низькою електричною провідністю. На певній віддалі від поверхні встановлено ділянку середовища B із високою електричною провідністю. Між ділянками P та B встановлено ділянку електрично непровідного середовища C .

Для урахування граничних умов прийнято, що при переході у верхній частині середовища P є тільки тангенціальна складова потоку Φ_t . У всі інші сторони існує тільки нормальна складова Φ_n . Таким чином, тільки у верхній частині середовища A є розрив у лініях електричного потоку. Джерело струму приєднано до провідного середовища B . Його потенціал $-1B$.

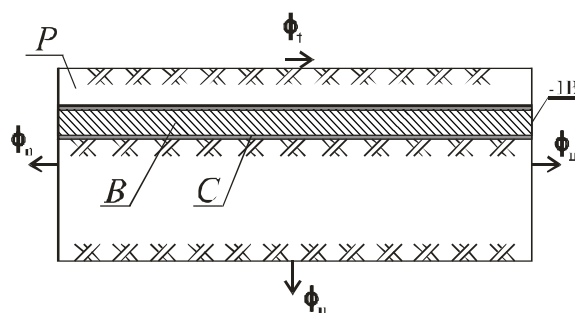


Рис. 1. Електрична модель ділянки трубопроводу

Таким чином, моделюється (рис. 2) ґрунт 1 із прокладеним металевим ізованим трубопроводом 3, до якого приєднано джерело катодної поляризації. Для моделювання пошкодження в ізоляційному покритті 2 в ділянці із непровідного середовища зроблено розрив 4.

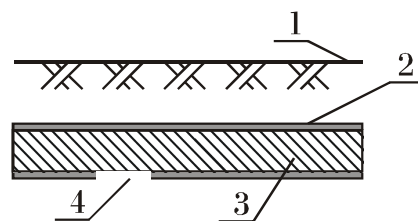


Рис. 2. Модельована ділянка трубопроводу із пошкодженням

Для моделювання пошкодження в ізоляційному покритті розрив розташовувався як зверху, так і знизу труби. Метою моделювання є визначення впливу положення пошкодження в ізоляційному покритті на результати вимірюваної різниці потенціалів між трубопроводом і ґрунтом (рис. 3)

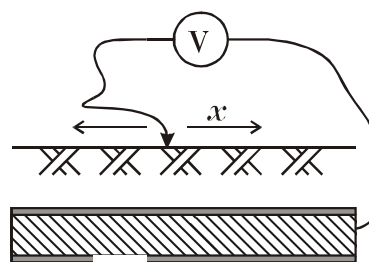


Рис. 3. Спосіб вимірювання потенціалу труба-ґрунт

У моделі не враховано залежність струму від потенціалу в місці контакту двох провідних середовищ за третьою граничною умовою (9).

На рис. 4 представлено результати дослідження потенціалу по поверхні ґрунту. Вибір потенціалу $-1B$, який накладається на одну сторону труби, обумовлений середнім значенням захисного потенціалу катодної поляризації. За результатами

дослідження моделі видно, що потенціал на поверхні ґрунту має суттєву залежність від місця знаходження пошкодження. При пошкодженні внизу труби потенціал на поверхні змінюється на 0,1В, що може сприйматися як відсутність пошкодження. У той же час пошкодження у верхній частині труби визначається чітко.

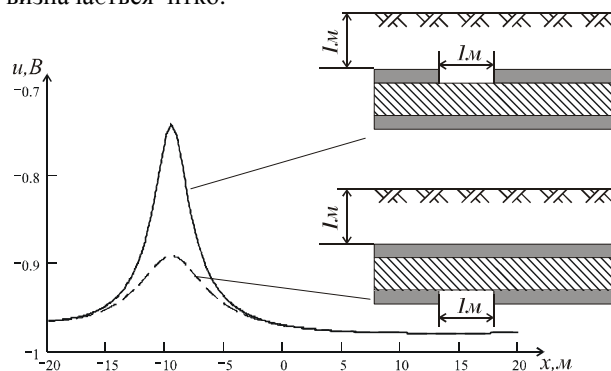


Рис. 4. Результати моделювання пошкодження ділянки ізоляційного покриття

Було також розглянуто розподіл потенціалів при вдвічі ширшому пошкодженні ізоляційного покриття. Результати досліджень наведено на рис. 5. Аналізуючи наведені залежності, можна зробити висновок про суттєву залежність електричного потенціалу на поверхні ґрунту від місця знаходження пошкодження.

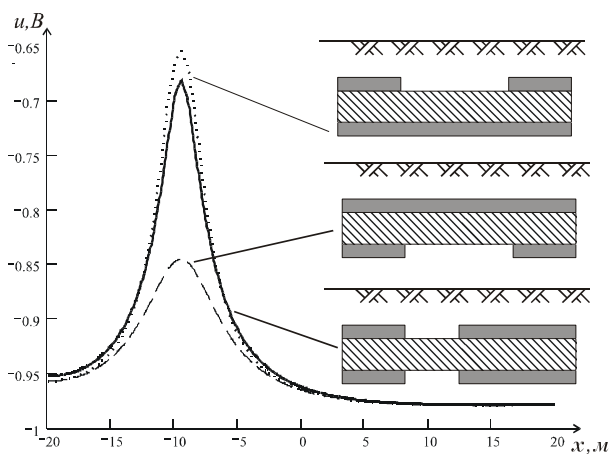


Рисунок 5. Результати моделювання двох ділянок із пошкодженням в ізоляційному покритті

Якщо визначити розподіл постійного потенціалу на поверхні ґрунту, струм в трубі, та при умові відомого геометричного положення трубопроводу і параметрів ґрунту можна визначити стан ізоляційного покриття.

На практиці розподіл електричного потенціалу в місці залягання трубопроводу визначити порівняно нескладно, однак визначити розподіл струму, який протікає по трубопроводу, важче. Струм у стінках

трубопроводу визначають за спадом напруги на ділянці трубопроводу. Для цього необхідно мати електричний контакт з трубопроводом. Детальність досліджень в даному випадку визначається віддалю між ділянками, на яких обладнано контрольно-вимірювальні колонки.

Порівняно нескладно можна визначити струм у будь-якому перерізі трубопроводу якщо струм буде змінний. Визначення проводяться без контакту із трубою за результатами вимірювання напруженості змінного магнітного поля. Виміряти параметри змінного магнітного поля простіше. Це розширює можливості контролю. Однак побудувати адекватну математичну модель змінного електромагнітного поля в багатошаровому середовищі, яким є ґрунт, суттєво складніше. Трубопровід представляють довгим провідником, по якому протікає досліджуваний струм.

Для аналізу розподілу магнітного поля змінного струму аналізується частковий випадок загального хвильового рівняння для вектор-потенціалу A [3]:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + k_n^2 \cdot A = 0, \quad (10)$$

де k_n - хвильове число середовища, у якому поширюється електромагнітна хвиля,

$$k_n^2 = \frac{\omega^2 \cdot \epsilon_n \cdot \mu_n}{c^2} \cdot \left(1 + i \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot \gamma_n}{\omega \cdot \epsilon_n} \right), \quad (11)$$

де ω - колова частота поля; ϵ_n, μ_n - діелектрична та магнітна проникності середовища n ; γ_n - питома електрична провідність середовища n .

Похідна $\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}$ має бути рівною 0 для нескінченного провідника зі струмом. У даному випадку розглядається модель з нескінченим провідником із струмом у багатошаровому середовищі (рис. 6).

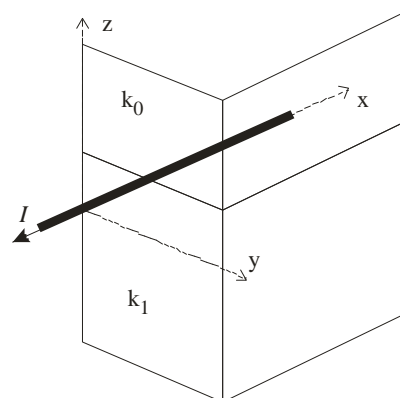


Рис. 6. Модель нескінченного провідника зі струмом

Розподіл напруженості змінного магнітного поля прямолінійного нескінченного провідника із струмом у вакуумі описується законом Біо-Савара [4]. Для визначення змінної складової струму в ближній зоні використовують квадратичну залежність напруженості магнітного поля від віддалі. Ця залежність проста і дає можливість визначати струм у провіднику за виміряним напруженням магнітного поля поблизу провідника.

Закон Біо-Савара не враховує властивості середовища, в якому прокладено трубопровід і наявності розділу середовища ґрунт-повітря. Оскільки вимірювання напруженості магнітного поля проводять в середовищі повітря, то це вносить неточності в інтерпретацію результатів.

Знаходження рекурентного співвідношення для визначення напруженості змінної складової магнітного поля заглибленого провідника із струмом має певні складнощі. Розв'язки знаходять для конкретної задачі із нехтуванням сторонніх і незначних впливів [5].

Інший шлях аналізу залежності - це числовий експеримент [6]. Було проведено числове моделювання залежності горизонтальної змінної складової магнітного поля для визначення впливу середовища на характер цієї залежності. Приймалося, що структура ґрунту однорідна. Струм змінюється за гармонійним законом і має амплітуду 1А. Вісь струму знаходиться на глибині 0,5м (рис. 6). Визначалась горизонтальна складова магнітного поля, тобто компонента H_y . Середовище, яке моделює повітря, має нульову електричну провідність і одиничну магнітну та електричну проникність. Середовище, що моделює ґрунт, має змінювану в процесі досліджень електричну провідність. Відносну електричну проникність ґрунту прийнято 10, а відносну магнітну – 1. Метою експерименту було встановити якісний характер залежності горизонтальної складової напруженості змінного магнітного поля від частоти та електричної провідності ґрунту.

Перший експеримент проводився для різних частот струму при опорі ґрунту 1 Ом·м. Результати моделювання наведено на рис. 7. Суцільною лінією позначено результати для частоти 100Гц, точками - для частоти 10кГц, короткими штрихами - частота 50кГц і штрих пунктирною лінією для частоти 100кГц. Із наведених результатів видно, що зі зростанням частоти характер залежності змінюється. Збільшується відхилення від залежності за законом Біо-Савара.

При цьому, якщо розглянути результати моделювання магнітного поля в ґрунтах із різною провідністю, відхилення на високих частотах зменшується зі зменшенням провідності ґрунту.

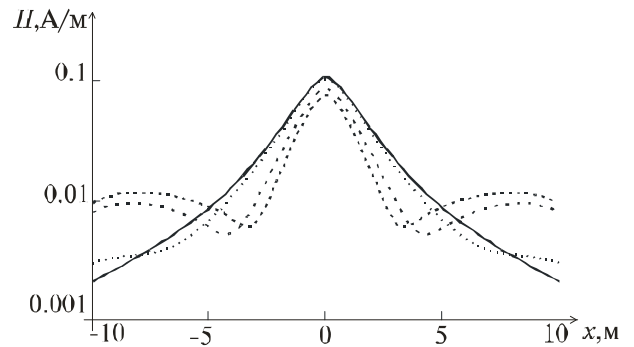


Рис. 7. Залежність горизонтальної складової напруженості магнітного поля від частоти

Другий експеримент проводився для різних опорів ґрунту при фіксованій частоті струму 50кГц. Результати моделювання наведено на (рис. 8) суцільною лінією для ґрунту із опором 1 Ом·м, штриховою лінією для ґрунту із опором 100 Ом·м. Також для порівняння наведено результати моделювання струму із частотою 100 Гц для ґрунту із опором 100 Ом·м (штрих-пунктирна лінія). Із наведених результатів видно, що зі збільшенням провідності ґрунту зростає відхилення від закону Біо-Савара.

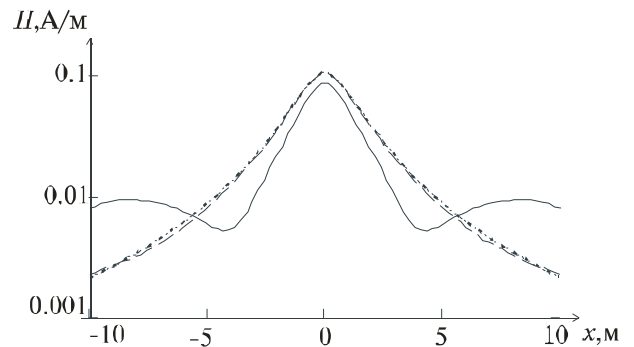


Рис. 8. Залежність горизонтальної складової напруженості магнітного поля від провідності ґрунту

Це приводить до помилок у визначенні струму, який утворив досліджуване електромагнітне поле й помилок у подальшому визначенні стану ізоляційного покриття.

Наведені результати числових експериментів дослідження математичних моделей, які описують поведінку електромагнітного поля постійного і змінного струму в оточуючому середовищі підземного металевих трубопроводів. Проведені дослідження показують важливість вдосконалення методик проведення контролю стану ізоляційного покриття підземних металевих трубопроводів, оскільки вплив деяких параметрів, які при дослідженнях до уваги не приймаються, є суттєвим.

1. Шимони К. Теоретическая электротехника. Мир. М.: -1964. -773 с.
2. V.G. DeGiorgi. Corrosion basics and computer modeling. Industrial Applications of the BEM.
3. Заборовский А.И. Переменные электромагнитные поля в электроразведке. Изд. Московского университета. М.: - 1960. -186с.
4. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. Энергия. М.: - 1968. -488с.
5. Дикмарова Л.П. Анализ геометрии установок индуктивных методов электроразведки. Наукова думка. Київ:- 1968. -155с.
6. Семенов В.С. Неведомский А.В. Дыбовский В.Г. Возбуждение полей плоской электромагнитной волны двух проводящих цилиндров в слоистой земле.- «Журнал радиоэлектроники» № 5, 1999.